Québec

Note de recherche forestière n° 124

Prédiction du carbone organique dans les sols forestiers du Québec

Sylvie TREMBLAY, Rock OUIMET et Daniel HOULE

F.D.C. 114.2(047)(714)
L.C. SD 390

Résumé

Les sols forestiers constituent un important réservoir de carbone organique qui, advenant un réchauffement climatique ou à la suite du déboisement, peut devenir une source importante de CO_2, ce qui entraînerait une augmentation de l'effet de serre et, par conséquent, du réchauffement de la planète. Il est donc essentiel de mesurer le carbone organique de ce réservoir, afin d'en suivre l'évolution face aux perturbations anthropiques. Toutefois, il n'existe pas de méthode rapide et économique pour mesurer le contenu en carbone organique des sols forestiers sur de vastes superficies.

Nous avons donc mis au point des modèles de prédiction de la quantité de carbone organique dans les sols forestiers minéraux du Québec, à partir de variables de l'inventaire pédologique, parce qu'elles sont des variables facilement disponibles et souvent déjà mesurées sur un grand territoire. Le modèle de prédiction du carbone organique dans la couverture morte comprenait les variables suivantes : épaisseur de la couverture morte, ainsi que latitude et longitude. Le modèle de prédiction des horizons minéraux, quant à lui, comprenait principalement des variables qui décrivaient la couleur du sol. Ces modèles nous ont permis de prédire la quantité de carbone organique dans 5 547 pédons répartis à travers la forêt commerciale du Québec, puis de construire des cartes du carbone organique dans les sols forestiers minéraux à l'échelle de la province.

Cette étude démontre qu'il est possible, sur un territoire aussi vaste que 750 300 km^2, de quantifier approximativement et à peu de frais le carbone organique dans les sols forestiers minéraux, afin d'en faire le suivi face au réchauffement climatique ou au déboisement.

Mots clés : carbone organique du sol, couleur des sols, sols forestiers, humus, indicateur d'aménagement forestier durable.

Abstract

Forest soils are important reservoirs of organic carbon, and in the event of global warming or deforestation, this reservoir could become an important source of CO_2, resulting in an increase in the greenhouse effect and, consequently, global warming. Faced with anthropomorphic disturbances and to monitor its evolution, it is therefore essential to measure the organic carbon in this reservoir. However, no rapid and economical method exists to the measure the organic carbon content in forest soils over vast areas.

We therefore developed models to predict the organic carbon of forest soils in Québec, using soil-inventory variables, because they are readily available and often have already been measured over large areas. The prediction model for organic carbon contained on the forest floor includes the following variables: depth of the litter, latitude and longitude. The prediction model for soil mineral horizons mainly includes variables that describe soil colour. These models allow us to predict the quantity of organic carbon in 5,547 soil pits, distributed throughout Québec's commercial forests, then to construct maps of the organic carbon in forest mineral soils for the province.

This study shows that it is possible, in a territory as vast as 750,300 km^2, to approximate at low cost the quantity of organic carbon in forest mineral soils, in order to monitor it when faced with climatic warming or deforestation.

Keywords : Soil organic carbon, soil colour, forest soils, humus, indicators of sustainable forest management.

Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec) G1P 3W8 Canada

Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca

Ce texte est la version intégrale du mémoire présenté par les auteurs au XII[e] Congrès forestier mondial de septembre 2003 à Québec, Canada.

Les versions française et anglaise du mémoire original sont aussi disponibles en format PDF à l'adresse suivante :

Original text in english is also available in PDF form on web site :

http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/alias/cfm2003.html

104-02195/

Introduction

Le sol constitue un réservoir important de carbone organique (C_{org}) dans les écosystèmes terrestres, puisqu'il contient de deux à trois fois plus de C_{org} que la végétation (SCHLESINGER 1986). Toutefois, advenant un réchauffement climatique (MAKIPAA *et al.* 1999) ou à la suite du déboisement (ST-LAURENT *et al.* 2000), le sol peut devenir une source importante de CO_2 et contribuer à son tour au réchauffement climatique, à cause d'une décomposition accrue de la matière organique du sol. Même de petites pertes de C_{org} du sol pourraient augmenter significativement la concentration de CO_2 de l'atmosphère, car le sol contient deux fois plus de carbone que l'atmosphère (WATSON *et al.* 1990). Il en résulterait une menace certaine pour la santé des populations et l'équilibre de la planète. Le sol est donc une source potentielle de CO_2 à surveiller. Étant donné que le Québec renferme à lui seul environ 3 % du carbone mondial des sols, dont le tiers en forêt commerciale, et que les experts appréhendent une perte de carbone plus importante en zone boréale en raison d'un réchauffement maximal prévu sous ces latitudes (MITCHELL *et al.* 1990), il devient primordial que le Québec fasse un suivi du contenu en C_{org} de ses sols forestiers. D'ailleurs, le Conseil canadien des ministres des Forêts a déjà identifié le C_{org} dans les sols forestiers comme un indicateur de la contribution de la forêt au bilan planétaire du carbone, un des six critères de l'aménagement forestier durable (CCFM 1997).

Les pertes de C_{org} du sol occasionnées par le réchauffement climatique ou le déboisement s'effectueraient principalement par la couverture morte (horizons L, F et H), car c'est la couche du sol la plus vulnérable aux perturbations. Par exemple, ST-LAURENT *et al.* (2000) ont observé une diminution de 52 % de la quantité de C_{org} dans la couverture morte, de 7 à 22 ans après la coupe, dans l'Est du Québec, mais n'ont rapporté aucun changement significatif de la quantité de C_{org} dans les horizons minéraux. De plus, la couverture morte renferme une proportion importante du C_{org} du sol. PAQUIN *et al.* (2000) ont estimé cette proportion à 18 % dans les peuplements feuillus et à 43 % dans les peuplements résineux du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF), établi par le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN). Par conséquent, des pertes de C_{org} par la couverture morte causées par un réchauffement climatique ou le déboisement risquent non seulement d'augmenter de façon significative le CO_2 de l'atmosphère, mais aussi d'avoir un impact à long terme sur l'hydrologie, la qualité du sol et la nutrition des plantes (GARTEN *et al.* 1999).

Quantifier le contenu en C_{org} des sols forestiers est toutefois dispendieux et cette mesure ne fait pas partie de l'inventaire écologique standard au Québec. De plus, il n'existe que quelques modèles de prédiction du contenu en C_{org} dans la couverture morte (GRIGAL et OHMANN 1992, LISKI et WESTMAN 1997, KURZ *et al.* 1993) ou dans le sol minéral (KLOOSTERMAN *et al.* 1974, EVANS *et al.* 1985, FRANZMEIER 1988) et ce, pour une utilisation régionale seulement. Étant donné que la principale source d'information disponible sur les sols forestiers à l'échelle du Québec sont des descriptions au champ dans des relevés pédologiques, nous avons mis au point des modèles de prédiction de la quantité de C_{org} ($Mg.ha^{-1}$)[2] dans la couverture morte (Q_m) et dans le sol minéral (Q_m) à partir de variables du relevé pédologique pour les sols forestiers minéraux du Québec. Il nous a alors été possible de prédire la quantité de C_{org} dans plusieurs milliers de profils de sol, dont nous possédions le relevé pédologique, puis de construire des cartes de l'accumulation du C_{org} dans la couverture morte et le sol minéral à l'échelle de la forêt commerciale du Québec.

Matériel et méthodes

Les données du sol utilisées pour construire les modèles de prédiction provenaient de deux banques : celle du RESEF (153 pédons provenant de 16 stations feuillues et de 15 stations résineuses) établi par le MRN (GAGNON *et al.* 1994), et celle de la portion québécoise de la Compilation des sols minéraux de la forêt et de la toundra canadienne (130 pédons provenant de 26 stations feuillues et de 104 stations résineuses) (SILTANEN *et al.* 1997). De par la nature des données disponibles, notre étude s'est limitée aux sols forestiers minéraux du Québec, c'est-à-dire ceux dont l'épaisseur de la couverture morte était inférieure à 30 cm. Les données étaient réparties dans les trois provinces écoclimatiques canadiennes suivantes : subarctique, boréale de l'Est et tempérée froide.

La méthode de calcul de Q_m et de Q_m a été décrite par TREMBLAY *et al.* (2002). Les variables testées pour construire les modèles de prédiction de Q_m et de Q_m étaient principalement des variables du relevé pédologique, mais aussi des variables descriptives du peuplement et du site, géographiques et climatiques. De plus, cinq indices de couleur, exprimant l'intensité de la pédogenèse, ont été testés.

Résultats et discussion

Modèles de prédiction de Q_m et de Q_m

Le meilleur modèle de prédiction de Q_m ($R^2 = 0,76$, C.V. = 28,3 %) était composé de deux variables explicatives, chacune étant l'interaction de deux variables indépendantes : épaisseur de la couverture morte x longitude et latitude x longitude. Le pouvoir de prédiction de ce modèle semble acceptable, puisqu'il est supérieur à celui d'autres modèles déjà publiés ($R^2 = 0,40$, GRIGAL et OHMANN 1992; $R^2 = 0,36$, LISKI et WESTMAN 1997).

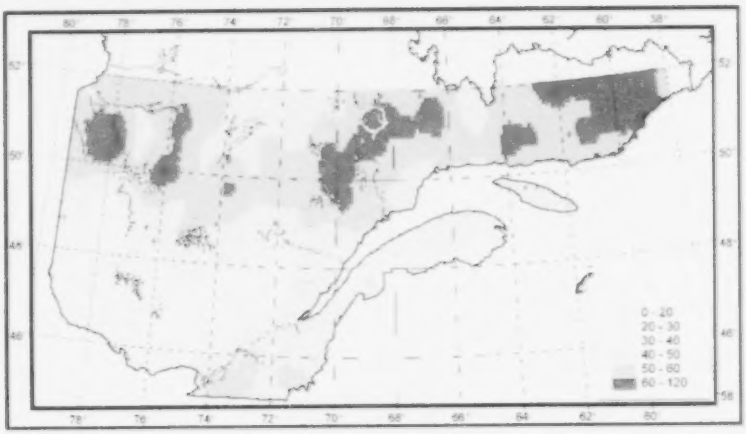
Le meilleur modèle de prédiction de Q_m ($R^2 = 0,57$, C.V. = 28,9 %) était composé des variables explicatives couleur, profondeur, texture et pH de chaque horizon minéral. Le pouvoir de prédiction de ce modèle est toutefois plus faible que celui obtenu par LISKI et WESTMAN (1997) ($R^2 = 0,80$), qui était composé des variables explicatives suivantes : type forestier et sommation de la température effective. Le pouvoir de prédiction limité de notre modèle s'explique probablement par l'erreur d'évaluation de la densité des horizons et celle du pourcentage de fragments grossiers dans le sol.

---

[1] Depuis le 29 avril 2003, le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) est désigné sous la nouvelle appellation de ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP)

[2] Mg = 1 000 000 grammes.

A) Couverture morte



B) Sol minéral

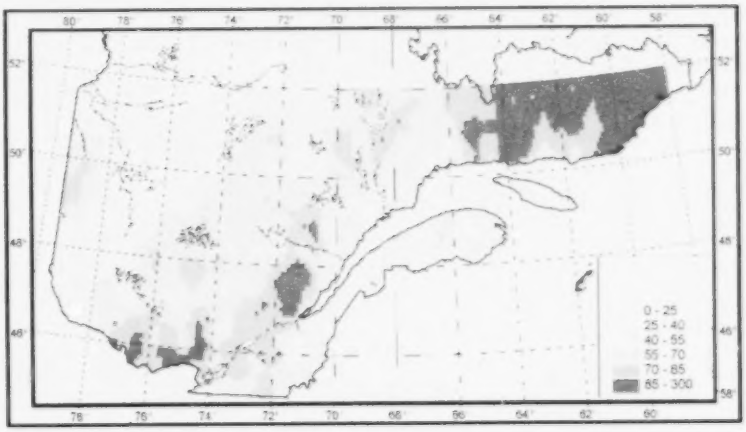


Figure 1. Cartes du contenu en C_{org} ($Mg.ha^{-1}$) des sols forestiers minéraux (épaisseur de la couverture morte inférieure à 30 cm) dans la forêt commerciale du Québec : ***A) couverture morte*** et ***B) sol minéral***. Les valeurs moyennes des classes les plus élevées sont 65 et 95 $Mg\,C.ha^{-1}$ pour la couverture morte et le sol minéral respectivement.

Prédiction de Q_{ff} et de Q_m pour les 5 547 pédons

Les valeurs moyennes de Q_{ff} par type de peuplement variaient de 38 à 58 Mg C.ha^{-1}, avec la plus faible valeur pour les peuplements feuillus et la plus haute valeur pour les peuplements d'épinettes. Ce résultat s'explique probablement par une plus grande résistance de la litière à la décomposition pour les résineux que pour les feuillus (PRESTON *et al.* 2000, KURZ *et al.* 1993). OUIMET *et al.* (1996) ont obtenu le même résultat (57 ± 7 Mg C.ha^{-1} vs 30 ± 3 Mg C.ha^{-1} pour des peuplements résineux et des peuplements de feuillus tolérants respectivement), ce qui reflète un taux de circulation du carbone différent dans ces deux types d'écosystème.

Les valeurs moyennes de Q_m par type de peuplement variaient de 44 à 70 Mg C.ha^{-1}. La plus faible valeur moyenne de Q_m a été obtenue pour les peuplements de pins, probablement à cause de la faible qualité de la litière, de la texture généralement sableuse et de la faible teneur en argile de ces sites, qui ne favorisent pas l'accumulation de matière organique dans le sol minéral (GRIGAL et OHMANN 1992). La plus haute valeur moyenne de Q_m a été obtenue pour les peuplements de feuillus tolérants, probablement à cause d'un enracinement plus profond et d'un pH de la litière plus élevé (FINZI *et al.* 1998), qui ont augmenté l'activité microbienne et, ainsi, l'incorporation de la matière organique entre la couverture morte et le sol minéral (LEE 1985). Enfin, Q_{tot} moyen (Q_{ff} + Q_m) variait de 85 à 118 Mg C.ha^{-1}, avec la plus faible valeur pour les peuplements de pins et la plus haute valeur pour les peuplements d'épinettes.

Ces contenus moyens en C_{org} du sol par type de peuplement peuvent constituer un premier guide pour aménager les forêts du Québec lorsqu'un des objectifs est de préserver, voire de maximiser, le C_{org} des sols forestiers d'un territoire donné.

Construction de cartes de Q_{ff} et de Q_m

La modélisation d'une organisation spatiale entre les valeurs prédites de Q_{ff} ou de Q_m ont permis de construire des cartes de Q_{ff} et de Q_m à l'échelle du Québec (Figure 1). Q_{ff} augmentait du sud vers le nord, atteignant des valeurs maximales dans la région écologique de la pessière à épinettes noires et mousses (Figure 1A). Des valeurs élevées de Q_{ff} ont aussi été observées dans la partie sud des basses-terres du Saint-Laurent et des Appalaches. Q_m était maximal le long de la vallée de la rivière Outaouais ainsi que dans la chaîne de montagnes des Laurentides, la Réserve faunique des Laurentides (nord de la ville de Québec) et le nord-est de la région Côte-Nord (Figure 1B). D'après ces cartes, les réservoirs de C_{org} les plus vulnérables au réchauffement climatique seraient les zones au nord, où Q_{ff} est maximal, c'est-à-dire la pessière à épinettes noires et mousses.

Les cartes obtenues dans cette étude peuvent difficilement être comparées à celles de LACELLE (1997), parce qu'elles sont différentes dans la méthode (interpolation vs polygones), le territoire étudié (seulement les sols forestiers minéraux vs tous les types de sol du territoire) et l'étendue des catégories. Nos cartes doivent aussi être interprétées avec précaution, car elles ne représentent que les sols forestiers minéraux. Elles sous-estiment donc l'accumulation de C_{org} du territoire pris dans son entier. Toutefois, ces cartes représentent le C_{org} du sol modifiable par l'aménagement forestier, puisque les travaux d'aménagement effectués sont principalement dans les peuplements sur sol minéral et que ce type de sol occupe presque la totalité du territoire forestier commercial du Québec (LAMONTAGNE et DROLET 1990). Par conséquent, ces premières cartes fournissent une image de référence qui permet de faire le suivi du C_{org} des sols susceptibles d'être modifiés par l'aménagement forestier.

Conclusion

Notre étude démontre qu'il est possible d'estimer, sur un territoire aussi vaste que la forêt commerciale du Québec (750 300 km^2), la quantité de C_{org} emmagasinée dans les sols forestiers minéraux à partir de variables pédologiques mesurées sur le terrain. Ces variables sont : l'épaisseur de la couverture morte, les latitude et longitude du pédon ainsi que la couleur mesurée avec la Charte Munsell, la profondeur, la texture et le pH des horizons minéraux du profil de sol. Ces variables peuvent donc être considérées comme des indicateurs de la contribution de la forêt au bilan planétaire du carbone, qui est un des six critères de l'aménagement forestier durable. Aussi, la compilation du contenu en C_{org} des 5 547 pédons par type de peuplement peut constituer un premier guide pour aménager les forêts du Québec en tenant compte du C_{org} des sols.

Enfin, les cartes de cette étude sont les premières de ce genre au Québec. Elles permettent de localiser les réservoirs de C_{org} les plus importants dans les sols forestiers minéraux et peuvent servir d'images de référence pour en faire le suivi face aux perturbations anthropiques, telles que le réchauffement climatique ou le déboisement.

Ouvrages cités

CANADIAN COUNCIL OF FOREST MINISTERS, 1997. *Critères et indicateurs de l'aménagement forestier durable des forêts au Canada : rapport technique*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Headquarters, Ottawa, Ont. 36 p.

EVANS, L.J. et B.H. CAMERON, 1985. *Color as a criterion for the recognition of podzolic B horizons*. Canadian Journal of Soil Science 65 : 363-370.

FINZI, A.C., N. VAN BREEMEN et C.D. CANHAM, 1998. *Canopy tree-soil interactions within temperate forests : species effects on soil carbon and nitrogen*. Ecological Applications 8(2) : 440-446.

FRANZMEIER, D.P., 1988. *Relation of organic matter content to texture and color of Indiana soils*. Proceedings of the Indiana Academy of Science 98 : 463-471.

GAGNON, G., C. GRAVEL, R. OUIMET, N. DIGNARD, R. PAQUIN, et G. ROY, 1994. *Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) – I - Définitions et méthodes*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 115. XIV + 40 p.

GARTEN, C.T., W.M. POST, P.J. HANSON et L.W. COOPER, 1999. *Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains.* Biogeochemistry 45(2) : 115-145.

GRIGAL, D.F. et L.F. OHMANN, 1992. *Carbon storage in upland forests of the Lake States.* Soil Science of the Society of American Journal 56 : 935-943.

KLOOSTERMAN, B., L.M. LAVKULICH et M.K. JOHN, 1974. *Use of soil data file for pedological research.* Canadian Journal of Soil Science 54 : 195-204. Kurz, W.A., M.J. Apps, T.M. Webb et P.J. McNamee, 1993. Le bilan du carbone du secteur des forêts du Canada : Phase 1. For. Can., Rég. Nord-Ouest, Cent. For. Nord, Edmonton (Alberta). Rapp. Inf. NOR-X-326F.

LACELLE, B. 1997. *Canada's soil organic carbon database. In* R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart (ed.) Soil processes and the carbon cycle. Advances in soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida : 93-101.

LAMONTAGNE, L. et J.-Y. DROLET, 1990. *Soil landscapes of Canada, Quebec-Southeast.* Agric. Can. Publ. N° 5288/B.

LEE, K.E., 1985. *Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use.* Academic Press, Sydney, Australia.

LISKI, J. et C.J. WESTMAN, 1997. *Carbon storage in forest soil of Finland. 1. Effect of thermoclimate.* Biogeochemistry 36 : 239-260.

MAKIPAA, R., T. KARJALAINEN, A. PUSSINEN et S. KELLOMAKI, 1999. *Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone.* Canadian Journal of Forest Research 29(10) : 1490-1501.

MITCHELL, J.F.B., S. MANABE, V. MELESHKO et T. TOKIOKA, 1990. *Equilibrium climate change and its implications for the future. In* Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Ed.). Climate Change, The IPCC scientific assesment (p. 131-172). University press, Cambridge.

OUIMET, R., S. ST-LAURENT, C. CAMIRÉ et G. GAGNON, 1996. *Carbon storage in forest ecosystems of the RESEF (Réseau d'Étude et de Surveillance des Écosystèmes forestiers) Québec long-term monitoring stations.* Canadian Journal of Soil Science 76 : 217-218.

PAQUIN, R., L. DUCHESNE, D. HOULE, J.D. MOORE, R. OUIMET, S. ST-LAURENT et S. TREMBLAY, 2000. *Effets des stress environnementaux et des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers du Québec.* Bilan de dix ans de recherche à la Direction de la recherche forestière. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport interne n° 451, 92 p.

PRESTON, C.M., J.A.T. TROFYMOW et THE CANADIAN INTERSITE DECOMPOSITION EXPERIMENT WORKING GROUP, 2000. *Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests.* Canadian Journal of Botany 78 : 1269-1287.

SCHLESINGER, W.H., 1986. *Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery.* Chapter 11, p. 194-220. *Dans* : J.R. Trabalka and D.E. Reichle (eds.) The changing carbon cycle – A global analysis. Springer-Verlag, New York, NY.

SILTANEN, R.M., M.J. APPS, S.C. ZOLTAI, R.M. MAIR et W.L. STRONG, 1997. *A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils.* Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. 50 p.

ST-LAURENT, S., R. OUIMET, S. TREMBLAY et L. ARCHAMBAULT, 2000. *Évolution des stocks de carbone organique dans le sol après coupe dans la sapinière à bouleau jaune de l'Est du Québec.* Canadian Journal of Forest Research 80 : 507-514.

TREMBLAY, S., R. OUIMET et D. HOULE, 2002. *Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Québec, Canada.* Canadian Journal of Forest Research 32 : 1-12.

WATSON, R.T., H. RHODHE, H. OESCHGER et U. SIEGENTHALER, 1990. *Greenhouse gases and aerosols. Dans :* Houghton J.T., G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (Ed.). Climate Change, The IPCC Scientific Assessment (p. 1-40). University Press, Cambridge.

2003-3118

ISBN 2-550-41802-6
Dépôt légal 2003
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© 2003 Gouvernement du Québec

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

Prediction of Organic Carbon in Forest Soils in Québec

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
by the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

September 2003

Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

Prediction of Organic Carbon in Forest Soils in Québec

by

Sylvie Tremblay[1], Rock Ouimet[2] and Daniel Houle[3]

Research Note
Tabled at the XII World Forestry Congress – Québec, Canada 2003,
By the *Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec*

Ministère des ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP)
Direction de la recherche forestière (Forest Research Branch)
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
CANADA

Telephone: (418) 643-7994
Fax: (418) 643-2165

sylvie.tremblay@mrnfp.gouv.qc.ca
rock.ouimet@mrnfp.gouv.qc.ca
daniel.houle@mrnfp.gouv.qc.ca

www.forestrycongress.gouv.qc.ca
www.mrnfp.gouv.qc.ca

---

[1] Forest Engineer, M.Sc.
[2] Forest Engineer, Ph.D.
[3] Biologist, Ph.D.

Abstract

Forest soils are important reservoirs of organic carbon, and in the event of global warming or deforestation, this reservoir could become an important source of CO_2, resulting in an increase in the greenhouse effect and, consequently, global warming. Faced with anthropomorphic disturbances and to monitor its evolution, it is therefore essential to measure the organic carbon in this reservoir. However, no rapid and economical method exists to the measure the organic carbon content in forest soils over vast areas.

We therefore developed models to predict the organic carbon of forest soils in Québec, using soil-inventory variables, because they are readily available and often have already been measured over large areas. The prediction model for organic carbon contained on the forest floor includes the following variables: depth of the litter, latitude and longitude. The prediction model for soil mineral horizons mainly includes variables that describe soil colour. These models allow us to predict the quantity of organic carbon in 5,547 soil pits, distributed throughout Québec's commercial forests, then to construct maps of the organic carbon in forest mineral soils for the province.

This study shows that it is possible, in a territory as vast as 750,300 km^2, to approximate at low cost the quantity of organic carbon in forest mineral soils, in order to monitor it when faced with climatic warming or deforestation.

Keywords: Soil organic carbon, soil colour, forest soils, humus, indicators of sustainable forest management

Introduction

Soil is an important reservoir of organic carbon (C_{org}) in terrestrial ecosystems, since it contains two to three times more C_{org} than does vegetation (Schlesinger 1986). However, in the event of global warming (Makipaa et al. 1999) or following deforestation (St-Laurent et al. 2000), soils can become an important source of CO_2 and contribute in turn to global warming, because of a speedier decomposition of organic matter in the soil. Even small losses of soil C_{org} could significantly increase the concentration of atmospheric CO_2, because the soil holds twice as much carbon as does the atmosphere (Watson et al. 1990). This outcome could endanger human health and the planetary balance. Soil is therefore a potential source of CO_2 that requires monitoring. Given that Québec alone accounts for about 3% of the world's soil carbon, a third of which is in commercial forests, and that experts are aware that more carbon loss would occur in the boreal zone because the maximum warming foreseen would take place in those latitudes (Mitchell et al. 1990), it is essential that Québec carry out continuous monitoring of C_{org} in its forest soils. Furthermore, the Canadian Council of Forest Ministers has already identified C_{org} in forest soils as an indicator of the contribution of the forest to the global carbon budget, one of the six criteria of sustainable forest management (CCFM 1997).

Losses of C_{org} from the soil brought about by global warming or deforestation occurs mainly from the forest floor (L, F, and H horizons), because that is the most vulnerable soil layer to disturbance. For example, St-Laurent et al. (2000) observed a 52% decrease in the quantity of C_{org} in the litter, seven to 22 years after cutting in eastern Québec, but reported no significant change in the quantity of C_{org} in soil mineral horizons. The litter contains a large proportion of the soil C_{org}. Paquin et al. (2000) estimated it at 18% in hardwood and 43% in softwood stands in the *Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers québécois* (RESEF) [Québec Forest Ecosystems Research and Monitoring Network], established by the *Ministère des Ressources naturelles du Québec* (MRN)[4]. Consequently, losses of C_{org} from the forest floor caused by global warming or deforestation risks not only significantly increasing atmospheric CO_2, but also resulting in a long-term impact on soil hydrology and quality, and plant nutrition (Garten et al. 1999).

Quantifying the C_{org} content of forest soils is expensive, and is not part of standard ecological inventories in Québec. Also, only a few models exist of C_{org} content in the forest floor (Grigal and Ohmann 1992; Liski and Westman 1997; Kurz et al. 1993) or in mineral soil (Kloosterman et al. 1974; Evans et al. 1985; Franzmeier 1988), and these are for regional use only. Given that the principal source of available information on forest soils at the provincial scale are field descriptions in soil surveys, we developed prediction models of the quantity of C_{org} (mg/ha)[5] in the forest floor (Q_{ff}) and in the mineral soil (Q_m) using soil inventory variables for forest mineral soils in Québec. It was therefore possible for us to predict the quantity of C_{org} in several thousand soil profiles for which we have soil survey data, and then to construct maps showing the

[4] On April 29, 2003, the Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) became the Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec (MRNFP).
[5] Mg= 1,000,000 grams

accumulation of C_{org} in the forest floor and the mineral soil at the scale of Québec's commercial forest.

Materials and methods

The soil data used to construct prediction models were taken from two data banks: the RESEF (153 soil pits from 16 hardwood and 15 softwood sites) established by the MNR (Gagnon et al. 1994), and the Québec portion of the Compilation of Mineral Soils in the Canadian Forest and Tundra (130 soil pits from 26 hardwood and 104 softwood sites) (Siltanen et al. 1997). By the nature of the available data, our study was limited to forest mineral soils in Québec, those for which the litter depth was less than 30 cm. Data were distributed in the following three ecoclimatic provinces: sub-arctic, eastern boreal and cold temperate.

The method used to calculate Q_{ff} and Q_m was described by Tremblay et al. (2002). The variables tested to construct the Q_{ff} and Q_m prediction models were mainly from the soil survey, but descriptive geographic and climatic variables for both the stand and site were also used. Also, five colour indices, expressing the intensity of the soil genesis, were tested.

Results and discussion

Q_{ff} and Q_m prediction models

The best prediction model for Q_{ff} ($R^2 = 0.76$, C.V. = 28.3%) was composed of two independent variables, each one being the interaction of two independent variables: depth of the litter x longitude and latitude x longitude. The predictive power of this model seems acceptable, since it is superior to the one produced by other published models ($R^2 = 0.40$, Grigal and Ohmann 1992; $R^2 = 0.36$, Liski and Westman 1997).

The best prediction model for Q_m ($R^2 = 0.57$, C.V. = 28.9%) was composed of independent variables for colour, depth, texture and pH for each mineral horizon. The predictive power of this model, however, is weaker than the one obtained by Liski and Westman (1997) ($R^2 = 0.80$), which was composed of the following independent variables: forest type and summation of the effective temperature. The limited predictive power of our model is probably explained by the evaluation error of soil horizon density and for the percent of coarse fragments in the soil.

Prediction of Q_{ff} and Q_m for 5,547 soil pits

The mean values of Q_{ff} by stand type vary from 38 to 58 mg C/ha, with the lowest value for hardwood stands and the highest for spruce stands. This result is likely explained by softwood litter having greater resistance decomposition than do hardwoods (Preston et al. 2000; Kurz et al. 1993). Ouimet et al. (1996) obtained the same result

(57 ± 7 mg C/ha vs 30 ± 3 mg C/ha for softwood and tolerant hardwoods, respectively), which reflects a different carbon circulation rate in the two ecosystem types.

The mean values of Q_m by stand type vary from 44 to 70 mg C/ha. The lowest mean value of Q_m was obtained for pine stands, probably because of the small amount of litter, the generally sandy soil texture and the low clay content of these sites, which does not favour the accumulation of organic matter in the mineral soil (Grigal and Ohmann 1992). The highest mean Q_m value was obtained in tolerant hardwood stand types, likely because of their deeper rooting habit and higher litter pH (Finizi et al. 1998). These increase microbial activity and, thus, the incorporation of organic matter between the litter and the mineral soil (Lee 1985). Finally, mean Qtot (Qf + Q_m) varied from 85 to 118 mg C/ha, with the lowest value in pine and the highest in spruce stands.

These mean C_{org} soil contents by stand type can serve as an initial guideline to manage Québec's forests when one of the objectives is to preserve, even maximize, the C_{org} in forest soils in a given area.

Construction of Q_{ff} and Q_m maps

By modelling a spatial relation between the predicted Q_{ff} or Q_m values, it was possible to construct Q_{ff} and Q_m maps at a provincial scale (**Figure 1**). Q_{ff} increased from south to north, attaining maximal values in the black spruce/moss ecological region (**Figure 1a**). Elevated Q_{ff} values were also observed in the southern part of the St. Lawrence Lowlands and the Appalachians. Q_m was at its highest along the Ottawa Valley and Laurentian mountains, the *Réserve faunique des Laurentides* (Laurentian Wildlife Reserve, north of Québec City) and the northeastern part of the North Shore region (**Figure 1b**). According to these maps, the most vulnerable C_{org} reserves to global warming would be in the northern zones, where Q_{ff} is maximum, that is, in the black spruce/moss type.

Maps created in this study can only be compared with difficulty to those of Lacelle (1997), because different methods were employed (interpolation vs polygons), the territory studied (only mineral forest soils vs all soil types) and the range of categories. Our maps must also be interpreted carefully, because they only represent forest mineral soils. Therefore, they underestimate C_{org} accumulation in an area taken as a whole. However, these maps represent the soil C_{org} that is modifiable by forest management, since management activities are carried out mainly in stands on mineral soils and these soils are found in almost the entire commercial forest area of Québec (Lamontagne and Drolet 1990). Consequently, these initial maps provide a reference image that permits monitoring C_{org} in soils that are likely to be modified by forest management.

Conclusion

Our study shows that it is possible to estimate, for a territory as vast as Québec's commercial forest area (750,300 km^2), the quantity of C_{org} stored in forest mineral soils

using variables measured in the field. These variables are: litter thickness, latitude and longitude of the soil pit along with the soil colour measured using the Munsell Chart, and the depth, texture and pH of the mineral horizons of the soil profile. These variables can therefore be considered as indicators of the forest's contribution to the global carbon budget, which is one of the six sustainable forest management criteria. Furthermore, the compilation of the C_{org} content of the 5,547 soil pits by stand type could be an initial guideline to manage Québec's forests by taking soil C_{org} into account.

Finally, the study's maps are the first of their type produced in Québec. They allow the localization of the largest C_{org} reservoirs in forest mineral soils, and can serve as reference images for monitoring anthropomorphic disturbances, such as global warming or deforestation.

References

Canadian Council of Forest Ministers. 1997. Critères et indicateurs de l'aménagement forestier durable des forêts au Canada : rapport technique. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, ON. 36 p.

Evans, L.J. and Cameron, B.H. 1985. Color as a criterion for the recognition of podzolic B horizons. Canadian Journal of Soil Science 65:363–370.

Finzi, A.C., Van Breemen, N. and Canham, C.D. 1998. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen. Ecological Applications 8 (2):440–446.

Franzmeier, D.P. 1988. Relation of organic matter content to texture and color of Indiana soils. Proceedings of the Indiana Acsademy of Science 98:463–471.

Gagnon, G., Gravel, C., Ouimet, R., Dignard, N., Paquin, R. and Roy, G. 1994. Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF) : I - Définitions et méthodes. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 115. XIV + 40 p.

Garten, C.T., Post, W.M., Hanson, P.J. and Cooper, L.W. 1999. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. Biogeochemistry 45 (2):15–145.

Grigal, D.F. and Ohmann, L.F. 1992. Carbon storage in upland forests of the Lake States. Soil Science of the Society of American Journal 56:935–943.

Kloosterman, B., Lavkulich, L.M. and John, M.K. 1974. Use of soil data file for pedological research. Canadian Journal of Soil Science 54:195–204.

Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. and McNamee, P.J. 1993. Le bilan du carbone du secteur des forêts du Canada : Phase 1. For. Can., Rég. Nord-Ouest, Cent. For. Nord, Edmonton (Alberta). Rapp. Inf. NOR-X-326F.

Lacelle, B. 1997. Canada's soil organic carbon database. *In*: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart (eds.). Soil processes and the carbon cycle. Advances in soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida. p. 93–101.

Lamontagne, L. and Drolet, J.-Y. 1990. Soil landscapes of Canada, Quebec-Southeast. Agric. Can. Publ. N° 5288/B.

Lee, K.E. 1985. Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney, Australia.

Liski J. and Westman, C.J. 1997. Carbon storage in forest soil of Finland. 1. Effect of thermoclimate. Biogeochemistry 36:239–260.

Makipaa, R., Karjalainen, T., Pussinen, A. and Kellomaki, S. 1999. Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone. Canadian Journal of Forest Research 29 (10):1490–1501.

Mitchell, J.F.B., Manabe, S., Meleshko, V., and Tokioka, T. 1990. Equilibrium climate change and its implications for the future. *In*: Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Eds.). Climate Change, The IPCC scientific assesment (p. 131–172). University Press, Cambridge.

Ouimet, R., St-Laurent, S., Camiré, C. and Gagnon, G. 1996. Carbon storage in forest ecosystems of the RESEF (Réseau d'Étude et de Surveillance des Écosystèmes forestiers) Québec long-term monitoring stations. Canadian Journal of Soil Science 76:217–218.

Paquin, R., Duchesne, L., Houle, D., Moore, J.D., Ouimet, R., St-Laurent, S. and Tremblay, S. 2000. Effets des stress environnementaux et des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers du Québec. Bilan de dix ans de recherche à la Direction de la Recherche forestière. Rapport interne no. 451. Ministère des Ressources naturelles du Québec. 92 p.

Preston, C.M., Trofymow, J.A.T. and The Canadian Intersite Decomposition Experiment Working Group. 2000. Variability in litter quality and its relationship to litter decay in Canadian forests. Canadian Journal of Botany 78:1269–1287.

Schlesinger, W.H. 1986. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. Chapter 11, p. 194–220. *In*: J.R. Trabalka and D.E. Reichle (eds.). The changing carbon cycle – A global analysis. Springer-Verlag, New York, NY.

Siltanen, R.M., Apps, M.J., Zoltai, S.C., Mair, R.M. and Strong, W.L. 1997. A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, AB. 50 p.

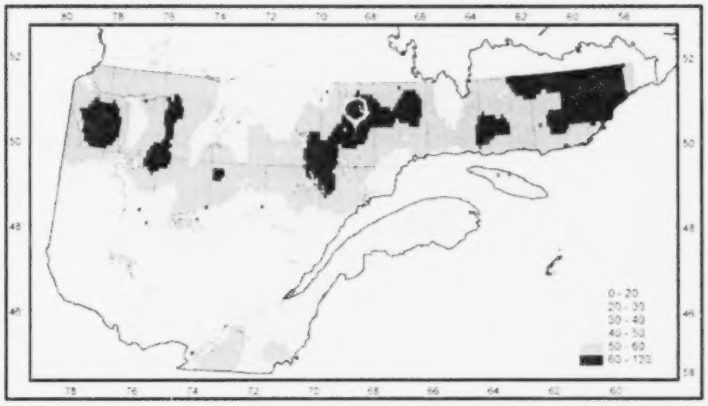
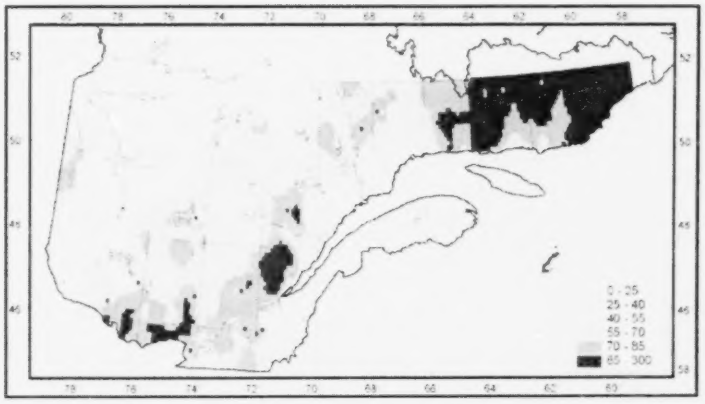
St-Laurent, S., Ouimet, R., Tremblay, S. and Archambault, L. 2000. Évolution des stocks de carbone organique dans le sol après coupe dans la sapinière à bouleau jaune de l'Est du Québec. Canadian Journal of Forest Research 80:507–514.

Tremblay, S., Ouimet, R. and Houle, D. 2002. Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Québec, Canada. Canadian Journal of Forest Research 32:1–12.

Watson, R.T., Rhodhe, H., Oeschger, H. and Siegenthaler, U. 1990. Greenhouse gases and aerosols. *In*: Houghton J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Eds.). Climate Change, The IPCC Scientific Assessment (p. 1–40). University Press, Cambridge.

Figure 1. Maps of the C_{org} content(mg/ha) of forest mineral soils (depth of the litter <30 cm) in Québec's commercial forests: ***A) Forest Floor***, and ***B) Mineral Soil***. The mean values of the most elevated classes are 65 to 95 mg C/ha for the forest floor and mineral soil, respectively.

A) Forest Floor



B) Mineral Soil